

DİREKT PÜSKÜRTMELİ BUJİ İLE ATEŞLEMELİ MOTORLAR

Can ÇINAR

Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Bölümü 06500 Beşevler/ ANKARA

ÖZET

Direkt püskürtmeli buji ile ateşlemeli motorlar, düşük yakıt tüketimi, yüksek çıkış gücü ve egzoz emisyonlarında sağladığı avantajlarla, son yıllarda dünya otomotiv endüstrisi tarafından geliştirilmekte ve taşıtlarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, buji ile ateşlemeli motorlarda kullanılan direkt püskürtmeli yakıt sistemleri incelenmiş, alışlagelmiş emme kanalına yakıt püskürtmeli motorlarla karşılaştırmalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Buji ile ateşlemeli motor, direkt püskürtme, yakıt tüketimi, egzoz emisyonları

DIRECT INJECTION SPARK IGNITION ENGINES

ABSTRACT

Direct injection spark ignition engines have been developed in recent years by world automotive industry for the purpose of fuel economy, improved output power and reduced exhaust emissions and have already been implemented in vehicles. In this study direct injection fuel systems in spark ignition engines was investigated and compared with conventional port fuel injected engines.

Key Words: Spark ignition engine, direct injection, fuel consumption, exhaust emissions

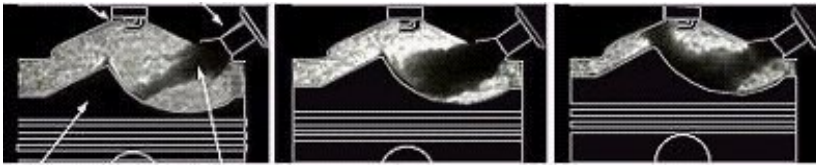
1. GİRİŞ

Günümüzde içten yanmalı motorlarda yapılan çalışmaların temelini, benzin motorlarının yüksek özgül çıkış gücü ile dizel motorlarının kısmi yüklerdeki yüksek veriminin bir araya getirilmesi oluşturmaktadır. Araştırmalar, dört zamanlı, buji ile ateşlemeli motor yükünün gaz kelebeksiz kontrolü ile direkt püskürtmeli (DP) benzin motorlarında bu hedefin gerçekleştirilebileceğini ortaya koymuştur. Direkt püskürtmeli motorlarda yakıt, emme veya sıkıştırma zamanında direkt olarak silindirin içerisine püskürtülmekte ve karışım burada oluşturulmaktadır. Motor çıkış gücü,

silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı değiştirilerek ayarlandığından, bu motorlar dizel motorlarına benzemektedir. Silindirlere hava herhangi bir kısılmaya maruz kalmadan alındığı için pompalama işi en aza indirilmektedir. Karışım buji ile ateşlendiği için, dizel motorlarındaki gibi karışımın kendiliğinden ateşlenmesi şartlarının ortaya çıkmasına gerek yoktur (1-6). Ayrıca fakir çalışma şartları oluşturularak, özgül yakıt tüketimi azaltılmıştır. Kademeli dolgulu bu motorlarda, düşük ve orta yüklerde yakıt bujide kıvılcım çakmadan hemen önce silindir içerisine püskürtülmektedir. Bu durumda silindir içerisindeki yakıt/hava oranı değişmekte bujiye yakın yerlerde karışım zengin, silindirin diğer kısımlarında ise fakir olmaktadır. Dolayısıyla silindirin içerisi bütün olarak düşünüldüğünde motor fakir karışımla çalışmaktadır. Relanti çalışma şartlarında karışım oranı 1/40'lara kadar düşmektedir. Tam yük çalışma şartlarında ise yakıt silindir içerisine emme zamanında püskürtülmeye başlanmakta, böylece karışım homojen dağılımlı ve stokiyometrik oranda olmaktadır.



DP motorlarda kademeli olarak yakıt, önce emme zamanında silindire püskürtülür ve soğutmakta ve volumetrik verimi arttırmaktadır (ön enjeksiyon). Esas püskürtme ise sıkıştırılmış hava ile stölü noktaya (ÜÖN) yaklaştığında, ateşlemeden hemen önce yapılmaktadır. Şekil 1'de, pistonun tepesi sayesinde, buji çevresindeki yakıt miktarı yoğunlaştırılmakta (zengin karışım) ve iyi bir ateşleme sağlanmaktadır. Bu şekilde DP benzin motorları kısmi yüklerde çok fakir karışımlarda bile (40/1) çalışabilmektedir.



40° önce ÜÖN

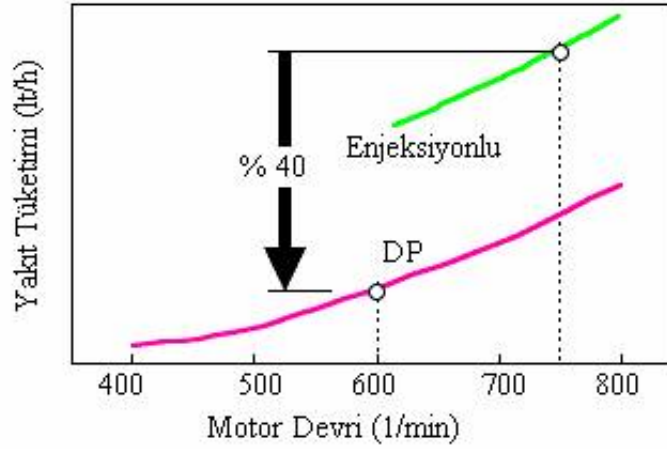
30° önce ÜÖN

20° önce ÜÖN

Şekil 1. Sıkıştırma zamanında silindir içerisine benzin püskürtülmesi

DP benzin motorlarında, özel şekilli pistonlar ve emme manifoldlarının pistonlarla uygun şekilde eşlenmesiyle, yanma odasında türbülans oluşturularak yakıt ile hava mükemmel şekilde karışmaktadır. Böylece yanma verimi iyileşmekte, kirletici emisyonlar azalmakta ve yakıt/hava oranı çok geniş bir aralıkta değiştirilebilmektedir. Düşük relanti devirlerinde bile düzgün bir yanma sağlanmakta ve motor devri geniş bir aralıkta esnek bir şekilde

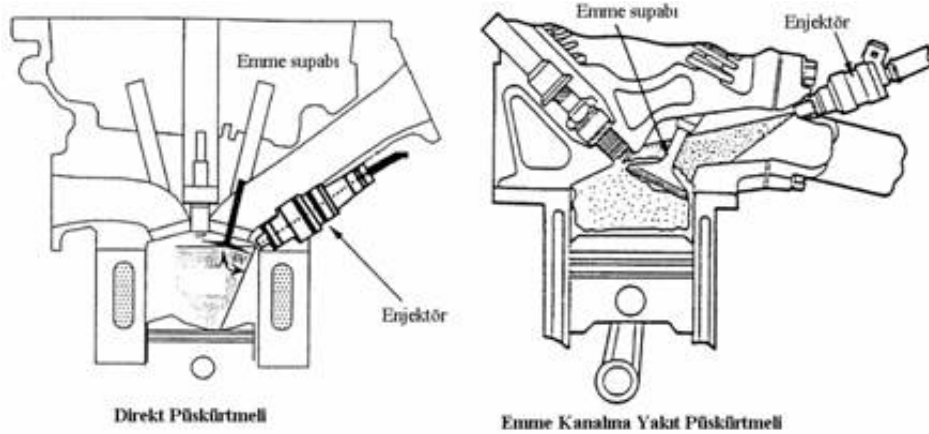
ayarlanabilmektedir. Alışlagelmiş motorlarla karşılaştırıldığında DP benzin motorları, relantide yaklaşık % 40 yakıt ekonomisi sağlamaktadır.



Şekil 2. DP benzin motorları ile relanti çalışma şartlarında yakıt tüketimindeki azalma

2. DİREKT PÜSKÜRTMELİ BENZİN MOTORLARI

DP ve emme kanalına yakıt püskürtmeli (EKYP) motorlar arasındaki temel fark karışımın hazırlanmasındadır (Şekil 3).

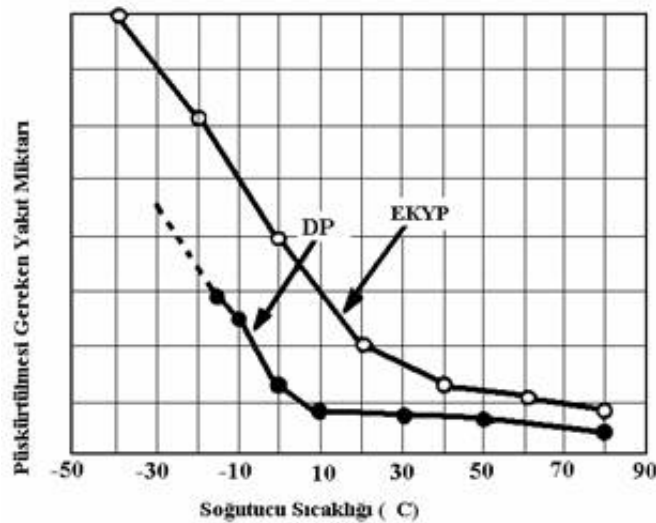


Şekil 3. Direkt püskürtmeli ve emme kanalına yakıt püskürtmeli motorlar [7,8]

EMKP motorda yakıt her bir silindirin emme portuna püskürtülür ve püskürtme ile yakıt/hava karışımının silindire alınması arasında bir zaman farkı vardır. Günümüz otomobil motorlarının büyük çoğunluğunda emme supabının kapanma zamanına kadar, supabının arkasına yakıt püskürtülmesi devam eder. Soğukta ilk hareket esnasında, emme supabı port yüzeylerinde sıvı yakıt taneciklerinin oluşturduğu geçici bir film veya birikinti oluşur. Bu durumda yakıtın dağıtılması gecikir ve yakıtın kısmi buharlaşmasından dolayı, doğal bir ölçme hatası olarak ideal stokiometrik oranı yakalamak için püskürtülen yakıt miktarı önemli miktarda artırılır. Bu yakıt birikintisi ve zaman

gecikmesi, motorun ilk 4-10 çevriminde kısmi yanma sebebiyle yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarında önemli bir artışa sebep olur. Alternatif olarak yakıtın direkt olarak silindirlerin içerisine püskürtülmesi ile yakıtın port duvarlarını ıslatması problemi tamamen ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca yakıtın silindir içerisine gönderilme zamanı kısaltmakta ve her bir yanma olayı için yakıt çok daha hassas bir şekilde ölçülebilmektedir. Herhangi bir çevrimde silindirlere giren gerçek yakıt miktarı direkt enjeksiyon sistemi ile EKYP sistemlerine göre, çok daha gerçekçi bir şekilde kontrol edilebilmektedir. DP motorlarda, karışım daha fakir, yakıt/hava karışımının silindirden silindire değişimi daha az ve özgül yakıt tüketimi daha düşüktür. Ayrıca, soğukta ilk harekette yanmamış HC emisyonları daha az ve motorun geçiş tepkisi daha iyidir. DP sisteminde yakıt basıncı daha yüksek olduğundan, EKYP motorlara göre silindir içerisinde daha iyi atomize olmakta ve özellikle soğuk çalışma şartlarında yakıtın çok daha iyi buharlaşması sağlanmaktadır. DP yakıt sisteminde, ortalama tanecik boyutu 16 mikron iken, EKYP sisteminde 120 mikron olmaktadır. DP benzin motorlarında yakıtın silindir içerisine direkt olarak püskürtülmesi, yakıt filmi oluşması problemini tamamen ortadan kaldırmamaktadır. Piston tepesinde ve yanma odasının diğer yüzeylerinde oluşan ıslaklık, geçici film oluşumu ve buharlaşmanın değişimi bakımından önemlidir [1].

DP yakıt sistemi, port duvarlarının ıslanması probleminin dışında, EKYP motorlardaki bir çok sınırlamaları ortadan kaldırmaktadır. Şekil 4'de DP ve EKYP motorlarda, motor çalışana kadar püskürtülmesi gereken yakıt miktarları görülmektedir [9]. DP yakıt sisteminde motorun ilk harekete geçmesi için gerekli olan yakıt miktarı çok daha azdır ve ortam sıcaklığı azaldıkça bu farkta büyümektedir.

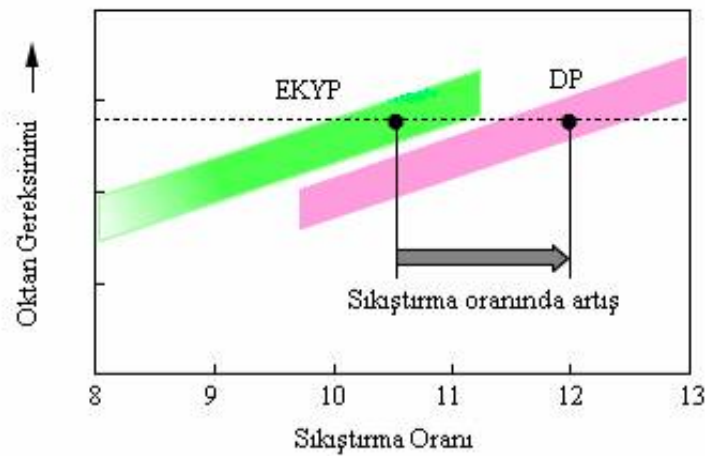


Şekil 4. DP ve EKYP yakıt sistemlerinde, farklı ortam sıcaklıklarında motorun ilk harekete geçmesi için gerekli yakıt miktarı [9]

EKYP motorlarda diğer bir sınırlama da, yük kontrolünün kelebek vasıtası ile yapılmasıdır. EKYP motorlarda kelebek

ile yük kontrolü geçerliliği kabul edilmiş ve güvenli bir mekanizma olmasına rağmen, kısılma ile meydana gelen kayıplar önemli boyuttadır. Düşük motor yüklerinde, yük seviyesini ayarlamak için kelebeğin kısılması ile pompalama kayıpları ve termik verimde azalma meydana gelmektedir. Günümüz EKYP motorları hala yük kontrolü için kelebek kullanmaktadırlar. Ayrıca bu motorlarda emme portunda sıvı yakıt filmi oluşumu devam etmektedir. Bu iki temel çalışma gereksinimi, EKYP motorlarda yakıt ekonomisi ve emisyonlara karşı yapılan çalışmaların önünde büyük engel oluşturmaktadır. EKYP motor teknolojisinde sürekli iyileştirmeler yapılsa da, hem yakıt ekonomisi hem de emisyonları birlikte iyileştirmek mümkün gözükmemektedir. DP motorlarda teorik olarak, hem bu iki önemli problem ortadan kaldırılmakta hem de performans sınırları genişletilmektedir. DP motorların EKYP motorlara teorik olarak üstünlükleri aşağıda özetlenmiştir:

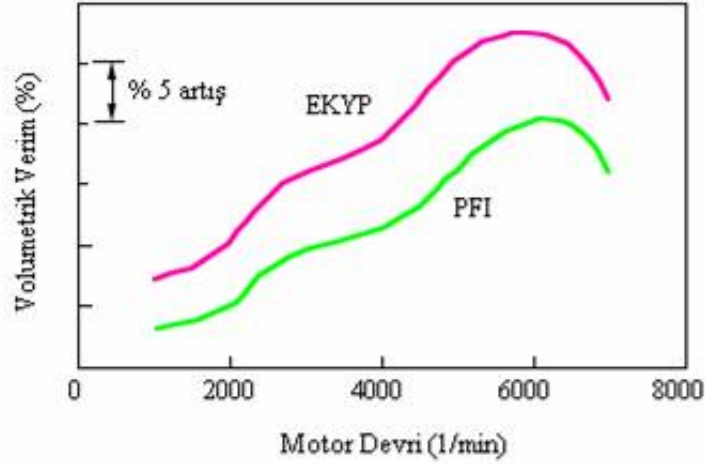
- Yakıt ekonomisinde iyileşme (% 25'e ulaşan potansiyel iyileşme)
 - pompalama kayıplarında azalma
 - ısı kayıplarında azalma
 - daha yüksek sıkıştırma oranı (emme esnasında püskürtme ve yakıtın buharlaşması ile silindirdeki havanın soğutulması motorun vuruşu temayülünü azaltmaktadır. Bu durum, yüksek sıkıştırma oranı ve yanma veriminde iyileşme sağlamaktadır)



Şekil 5. DP ve EKYP motorlarda sıkıştırma oranı değişimi

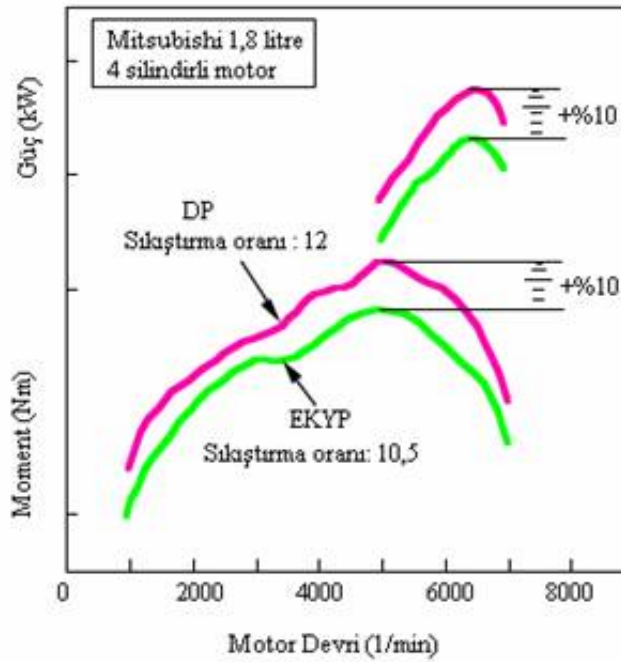
- daha düşük oktan sayılı benzin gereksinimi (emme esnasında püskürtme ile dolgunun soğutulması)
- volumetrik verimde artış (emme zamanında püskürtme ve yakıtın buharlaşması ile dolgunun

soğutulması, ayrıca yukarıya doğru ve düz emme portları daha iyi hava akışı sağlanarak volumetrik verimde artış sağlanmaktadır) (Şekil 6)



Şekil 6. DP ve EKYP motorlarda volumetrik verim değişimi [10]

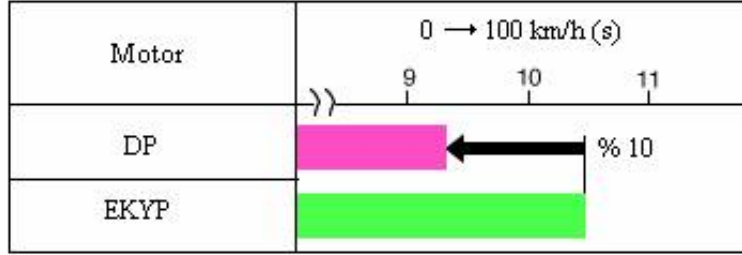
- ° taşıtın yavaşlaması sırasında yakıt kesme (manifoldda yakıt filmi oluşmamakta)
- ° motor performansında artış (EKYP motorlarla karşılaştırıldığında, DP motorlar bütün motor devirlerinde yaklaşık % 10 daha yüksek çıkış gücü ve motor momenti sağlar)



Şekil 7. DP yakıt sistemleri ile motor gücü ve momentte iyileşme [11]

- İyileştirilmiş geçiş tepkisi

- Taşıtın ivmelenmesi esnasında zengin karışım gereksiniminin azaltılması
- daha iyi taşıt ivmelenmesi (DP motorlar çok yüksek ivmelenme yeteneğine sahiptir)



Şekil 8. Taşıtın ivmelenmesi yönünden DP ve EKYP motorların karşılaştırılması [10]

- Daha kusursuz yakıt/hava oranı kontrolü
 - daha çabuk ilk hareket
 - soğukta ilk harekette daha az ek yakıt ihtiyacı
- Daha geniş egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) tolerans sınırı
- Emisyon yönünden sağlanan avantajlar
 - soğukta ilk harekette yanmamış HC emisyonlarının azaltılması
 - daha az karbondioksit (CO₂) emisyonları

“Common-rail” DP enjeksiyon sistemlerinde enjeksiyon basıncının, EKYP sistemlere göre önemli ölçüde büyük olması hem yakıtın atomizasyon derecesini hem de buharlaşma hızını arttırmaktadır. Böylece, bir veya ikinci enjeksiyondan sonra fazla yakıt gerektirmeden, yanma daha kararlı hale gelmektedir. Bu sebeple, DP motorlarda soğukta ilk harekette oluşan yanmamış HC emisyonları, kararlı çalışma şartlarındaki seviyeye yaklaşabilmektedir. Prototip bir Nissan DP motorunda soğukta ilk çalıştırmada oluşan yanmamış HC emisyonları, EKYP motora göre % 30 daha düşük çıkmıştır [12]. DP yakıt sisteminin diğer bir avantajı da yavaşlama esnasında yakıtın kesilmesidir. Bu sistem hem yakıt ekonomisinde, hem de yanmamış HC emisyonlarında önemli bir iyileşme sağlamaktadır. EKYP motorlarda yavaşlama esnasında yakıt kesilecek olursa, emme portunda oluşan yakıt filmi tabakası azalacaktır. Bu durumda, yanma birkaç çevrim boyunca fakir karışımla olacağından genellikle geri tepme meydana gelir. Bu

yüzden yavaşlamada yakıt kesme sistemi EKYP motorlarda uygulanabilir değildir.

EKYP motorların da DP motorlara göre bazı sınırlı avantajları vardır. EKYP motorlarda emme sistemi bir ön buharlaşma odası olarak görev yapar. Yakıt silindir içerisine direkt olarak püskürtüldüğünde, karışımın hazırlanma zamanı önemli ölçüde azalmaktadır. Sonuç olarak, yakıt spreyinin atomizasyonu, püskürtme ve ateşleme zamanları arasındaki sınırlı zamanda yakıtın buharlaşmasına yetecek kadar iyi olmalıdır. Buharlaşmamış yakıt damlacıkları, yayılan alev dalgasına kapılarak yanmamış HC emisyonu olarak ortaya çıkacaktır. Ayrıca, silindir içerisine direkt olarak püskürtülen yakıt piston tepesine veya silindir duvarlarına beklenmedik bir şekilde çarpabilir. Eğer motor tasarımında bu faktörler ortaya konulmazsa, yanmamış HC ve partikül emisyonu seviyesinin artması ve silindirlerin aşınması, iyi tasarlanmış bir EKYP motorundan daha fazla olabilir. DP motorların sağladığı önemli avantajların yanında, çözüm bekleyen bazı problemleri vardır. Bunlar, aşağıda sıralanmıştır.

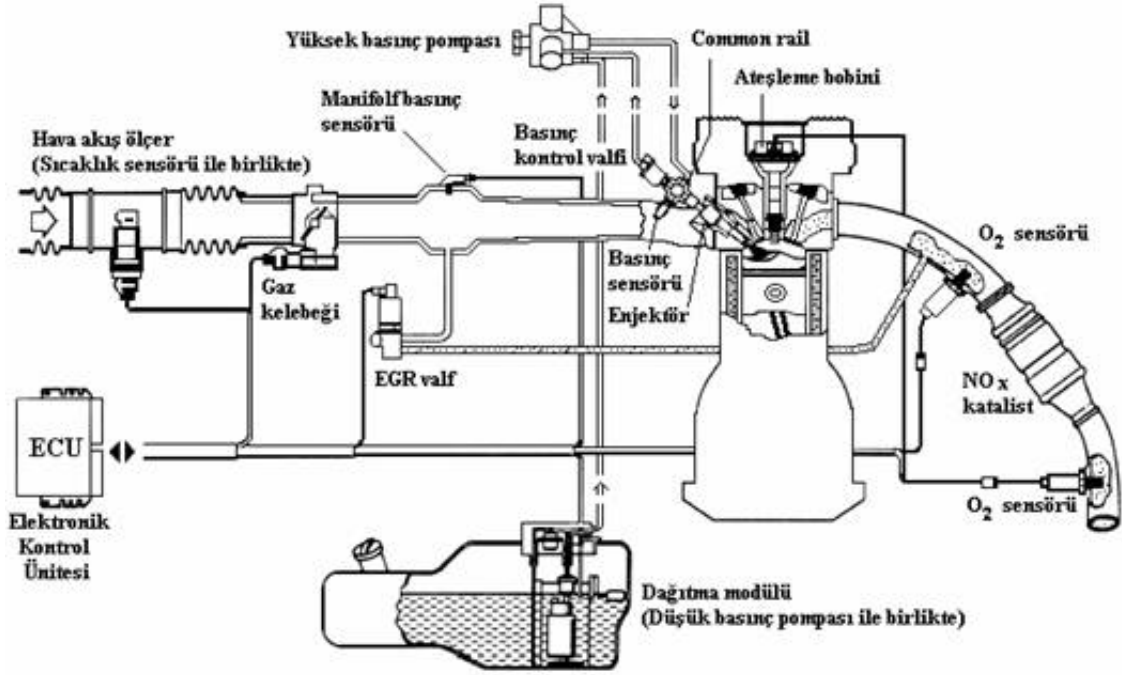
- Bütün çalışma aralıklarında karışım oluşturma zorlukları,
- Kademesiz yük değişimleri için karmaşık kontrol sistemleri gereksinimi,
- Enjektörde yüksek oranda birikinti oluşumu,
- Kısmi yüklerde yüksek oranda yanmamış HC emisyonları oluşumu,
- Tam yük çalışma koşullarında daha yüksek oranda (azot oksit) NO_x emisyonları,
- Kısmi yük çalışma şartlarında bölgesel NO_x oluşumunda artış,
- Tam yük çalışma şartlarında is oluşumu,
- Partikül emisyonlarında artış,
- 3 yollu katalizör kullanımında verim düşmesi,
- Yüksek basınç ve yakıtın yağlama özelliğinin az olması sebebiyle yakıt sistemi elemanlarında çabuk aşınma,
- Silindir aşınmasının artması,
- Enjektörler ve yakıt sisteminin diğer elemanları için elektrik güç ihtiyacında artış.

Bütün bu problemlerine rağmen, geliştirilmiş EKYP motorlarla karşılaştırıldığında DP benzin motorları gelecek için yeni bir ufuk açmaktadır. Bu motorlarla hem yakıt ekonomisi, hem de yanmamış HC emisyonlarındaki azalma aynı anda sağlanabilmektedir [1].

3. DİREKT PÜSKÜRTMELİ MOTORLARDA YAKIT SİSTEMİ

İçten yanmalı motorlarda yük kontrolü için gaz keleşbeğinin bertaraf edilmesi, volumetrik verimde artış ve pompalama kayıplarında önemli miktarda azalma sağlamaktadır. Bu yöntem dizel motorlarında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlarda bütün çalışma koşullarında hava ile yakıtın istenilen oranda karışması bir çok bağımsız değışkenden etkilendiğı için karışımın yanma odasında hazırlanması oldukça zordur. Başarılı bir yanma sisteminin geliştirilmesi yakıt enjeksiyon sisteminin optimum tasarımına ve silindir içi akış alanı ve yanma hızının kontrolü için sistem elemanlarının iyi bir şekilde eşlenmesine bağılıdır. Motorun bütün çalışma koşullarında yakıt spreyi çok iyi atomize olmalıdır. Verimli bir yanma için sprey geometrisi çok önemlidir [13]. Kelebezsiz, kısmi yük çalışma şartlarında DP yakıt sistemi, sıkıştırma zamanının sonunda silindir içersindeki 1 Mpa basınca kadar, hızlı bir şekilde enjeksiyon sağlayabilmelidir. Yakıt enjeksiyon basıncı, etkin bir atomizasyonu ve dağılımı sağlaması bakımından büyük önem taşımaktadır. Gereğinden daha yüksek yakıt enjeksiyon basıncı, ortalama yakıt spreyi çapını düşürür. Çok yüksek basınç (örneğin 20 MPa) atomizasyonu kuvvetlendirir ancak çoğunlukla yakıtın silindir duvarlarını ıslatmasına neden olur. Yakıt basıncı DP benzin motorlarında 4-13 Mpa arasında olmalıdır. Bu basınç 0,25-0,45 Mpa olan EKYP motorlara göre çok yüksektir. DP motorlarda enjektör ve yakıt pompasından kaynaklanan gürültü seviyesinin azaltılması çalışmaları devam etmektedir. DP uygulamalarının çoğunda, sabit yakıt enjeksiyon basınç hattı "common-rail" kullanılmaktadır. Farklı motor yük aralıklarında, farklı yakıt spreyleri sağlamak ve enjektörün lineer-dinamik aralık gereksinimi azaltmak için alternatif bir metot olarak değışken yakıt enjeksiyon basıncı uygulamaları da kullanılmaktadır [14,15].

DP motorlarda yakıt enjeksiyon sistemleri hem kısmi yüklerde aşırı fakir karışım oranları, hem de tam yükte emme zamanı esnasında başlayan enjeksiyonla homojen dağılımla stokiometrik karışım sağlamalıdır. Dizel ve EKYP benzin motorlarıyla karşılaştırıldığında, bu yakıt sisteminin gereksinimleri çok karmaşıktır. Yapılan son çalışmalarda elektromanyetik olarak tahrik edilen enjektörlerle common-rail enjeksiyon sistemlerinde bütün bu şartlar yerine getirilebilmektedir [16-20]. DP bir motorda common-rail yakıt sisteminin elemanları Şekil 9'da görölmektedir.



Şekil 9. Direkt püskürtmeli benzin motoru sistem şeması [21]

Günümüz kontrol sistemleri, karışımın hazırlanması ve kontrolü için karmaşık görevleri yerine getirebilmektedir. Örnek olarak, Toyota DP D-4 yanma sistemi, iki aşamalı enjeksiyon stratejisi ile kısmi ve tam yük çalışma şartları arasında geçişi iyileştirmiş, yakıt tüketimi % 30 azaltılmış ve taşıtın ivmelenmesi % 10 arttırılmıştır [22,23]. Mitsubishi DP motorlarla % 20-25 yakıt ekonomisi, % 20 daha az CO₂ emisyonları ve % 10 daha fazla çıkış gücü sağlamaktadır. Ayrıca, Mitsubishi firması DP motorlarında kullandığı, genişleme zamanında enjeksiyon ile egzoz sıcaklığını artırarak, soğukta ilk çalıştırmada katalist etkinliğini hızlandırmaktadır [22,24,25].

4. SONUÇLAR

Direkt püskürtmeli benzin motorları hem yakıt ekonomisi, hem de egzoz emisyonlarında sağladığı faydalarla giderek yaygınlaşmaktadır. Mitsubishi ,Toyota, Nissan, Mercedes ve Renault gibi otomotiv firmaları DP benzin motorlarını kullanmakta ve geliştirmektedir. Nasıl ki karbüratörlerin yerini port yakıt enjeksiyon sistemleri almışsa, gelecekte bu sistemlerin yerini de DP motorların alması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Zhao, F., Lai, M. C., Harrington, D. L., Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines, Progress in Energy and Combustion Science, USA, 1999.
2. Baranescu, G. S., Some Characteristics of Spark Assisted Direct Injection Engine, SAE Paper, No: 830589,

1983.

3. Duggal, V. K., Kuo, T.W. and Lux, F. B., Review of Multi-Fuel Engine Concepts and Numerical Modeling of In-Cylinder Flow Processes in Direct Injection Engines, SAE Paper, No: 840005, 1984.
4. Enright, B., Borman, G. and Myers, P. P., A Critical Review of Spark Ignited Diesel Combustion, SAE Paper, No: 881317, 1988.
5. Lida, Y., The Current Status and Future Trend of DISC Engines, Preprint of JSME Seminar (in Japanese), No: 920-48, 1992.
6. Wood, C. D., Unthrottled Open-Chamber Stratified Charge Engines, SAE Paper, No: 780341, 1978.
7. Zhao, F., Lai, M. C. and Harrington, D. L., A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark Ignited Direct-Injection Gasoline Engines, SAE Paper, No: 970627, 1997.
8. Ohya, Y., Nogi, T. and Ohsuga, M., Effects of Fuel/Air Mixture Preparation on Fuel Consumption and Exhaust Emission in a Spark Ignition Engine, ImechE Paper, No: 925023, C389/232, 1992.
9. Nohira, H., Development of Toyota's Direct Injection Gasoline Engine, Proceeding of AVL Engine and Environment Conference, 1997.
10. www.mitsubishi-motors.co.jp/inter/technology/GDI
11. Denson, T., Automobile Electrical and Electronic Systems, Second Edition, SAE International, 2000.
12. Takagi, Y., The Role of Mixture Formation in Improving Fuel Economy and Reducing Emissions of Automotive S.I. Engines, FISITA Technical Paper, No: P0109, 1996.
13. Kume, T., Iwamoto, Y., Lida, K., Murakami, M., Akishino, K. and Ando, H., Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine, SAE Paper, No: 960600, 1996.
14. Pischinger, F. and Walzer, P., Future Trends in Automotive Engine Technology, FISITA Technical Paper, No: P1303, 1996.
15. Pontoppidan, M., Gaviani, G. and Marelli, M., Direct Fuel Injection, a Study of Injector Requirements for Different Mixture Preparation Concepts, SAE Paper, No: 970628, 1997.
16. Buchheim, R. and Quissek, F., Ecological and Economical Aspects of Future Passenger Car Powertrains, FISITA Technical Paper, No: P1404, 1996.

17. Ronald, B., Helmut, T. and Hans, K., Direct Fuel Injection a Necessary Step of Development of the SI engine, FISITA Paper, No: P1613, 1996.
18. Mccann, K. A., MMC Ready with First DI Gasoline Engine, WARD's Engine and Vehicle Technology Update, 1995.
19. Pontoppidan, M., et al., Experimental and Numerical Approach to Injection and Ignition Optimization of Lean GDI-Combustion Behavior, SAE Paper, No: 1999-01-0173, 1999.
20. Yang, J. and Anderson, R., Use of Split Fuel Injection to Increase Full-Load Torque Output of a Direct-Injection SI Engine, SAE Paper, No: 980495, 1998.
21. Preussner, C., Doring. C., Fehler, S. and Kampmann, S., GDI: Inter-action Between Mixture Preparation Combustion System and Injector Performance, SAE Paper, No: 980498, 1998.
22. Ando, H., Mitsubishi GDI Engine Strategies to Meet the European requirements, Proceedings of AVL Conference on Engine and Environment, vol. 2, 1997.
23. Pontoppidan, M. et al., Experimental and Numerical Approach to Injection and Ignition Optimization of Lean GDI-Combustion Behavior, SAE Paper, No: 1999-01-0173, 1999.
24. Ando, H. et al., Combustion Control for Mitsubishi GDI Engine, Proceedings of the Second International Workshop on Advanced Spray Combustion, Hiroshima, Japan, 24–26 November, Paper No: IWASC9820, 1998.
25. Kuwahara, K. et al., Two-Stage Combustion for Quick Catalyst Warm-Up in Gasoline Direct Injection Engine, Proceedings of the Fourth International Symposium, COMODIA 98, 1998.